

別府温泉二三の湧出口導管中に於ける 泉温分布と途中冷却率^{*}

理 學 士 瀨 野 錦 藏
理 學 士 西 田 久 雄

1. 湧出口導管中の泉温分布と湧出量との關係

別府市に於ける温泉は先に紹介された如く、十數口の自然湧出を除く外は、「上總堀り」と稱する Boring によりて地に穿孔し之に竹又は金屬（多くは鐵）の導管を埋設して下層の温泉脈層の高温地下水を湧出せしむるものであるから、この導管中に於て必然的に温泉は管壁との摩擦、冷却の法則等が行はれてゐるであらう。而して前論文「別府温泉と潮汐」⁽¹⁾には、潮汐に伴ふ泉温變化は實際主としてこの途中冷却によるものと考へてある。然しその途中冷却なるものが果して埋設管内のみにて行はれるか或は埋設管に到達する以前の長い道中でも行はれるのかは未だ明瞭でなく、是非とも湧出中の泉管内温度分布を測定して實測によつて確證せられねばならぬのであつた。然るに多くの泉管は竹管で少しく年數を経れば内壁がほぐれ脆弱となつて居るから、寒暖計を挿入沈下せしめるなどの作業は所有者が承知して呉れず、又鐵管のものも上端が埋込になつてゐる目的を達せられないものが多い。今こゝには漸く温泉番號 220 及び 434 / 1 なる二湧出口について目的の觀測を爲し得たので、それについて報告する。今後機會のある毎にこの種の觀測を爲して實證して行く積りである。No. 422, No. 423, No. 434 / 4 に就ては上端泉温及び底温のみを得た。

導管中に寒暖計を沈下して行くとき導管中の温泉水壓の爲の影響を避ける爲に山下馨氏考案による眞鑄製寒暖計容器を用ふ。これを使用するのと露出して測定するのとは五分間放置しておけば、その示度に誤差なき事を確めた。尙又この容器を挿入することによつて湧出量にも影響を與へない事も確めた。この方法は下方ほど高温なることを豫想するものであるが、たとひ中途に高温なところがあるとしても容器の壁を肉厚にし、手ばやく上下

* この論文の要旨は昭和十二年五月東京で地球物理學會に發表した。

(1) 「別府温泉概観」, 本誌第 1 卷第 1 號 3 頁。

(2) 野滿・瀨野・中目; 本誌 第 2 卷第 1 號 1 頁。

別府温泉二三の湧出口導管中に於ける泉温分布と途中冷却率

すれば、かゝる高温をも影響なく観測できるであらう。但、今回のものはかゝるものはなかつたやうである。

以上の如き要旨にて数日間満干時刻を選んで、前記の二湧出口につき、導管中途の泉温分布とその時の湧出量とを測定した。第一表及び第三表に其の實測値を表示し第一圖に之

第一表 湧出導管中の泉温と湧出量

第一例 温泉 No. 434ノ1 $\gamma \frac{\partial T}{\partial r}$ (calorie, cm. min) (満)(干)はそれぞれ満潮時、干潮時に於ける観測なることを示す。

観測月日	(1) 1936.Ⅳ (干) 25 th 17 ^h 05 ^m ~18 ^h 48			(2) (満) 26 th 10 ^h 52 ^m ~12 ^h 21 ^m			(3) (満) 27 th 8 ^h 57 ^m ~9 ^h 59 ^m			(4) (干) 27 th 15 ^h 58 ^m ~17 ^h 26 ^m		
	深サ	温 度	湧出量	$\gamma \frac{\partial T}{\partial r}$	温 度	湧出量	$\gamma \frac{\partial T}{\partial r}$	温 度	湧出量	$\gamma \frac{\partial T}{\partial r}$	温 度	湧出量
m	°C	L/M		°C	L/M		°C	L/M		°C	L/M	
0	36.0	2.01		37.8	3.87		37.1	3.40		37.4	2.95	
20	38.1	1.99	0.125	40.0	3.82	0.266	39.5	3.41	0.265	39.3	2.89	0.172
40	39.5	1.93	0.137	41.5	3.84	0.211	41.3	3.43	0.228	40.7	2.89	0.221
60	41.8	1.93	0.157	43.0	3.77	0.237	43.1	3.44	0.270	43.5	2.75	0.206
80	44.0	1.93	0.172	45.0	3.71	0.220	45.5	3.56	0.205	44.6	2.75	0.121
100	46.6	1.96	0.152	46.1	3.69	0.136	46.2	3.40	0.104	45.9	2.65	0.108
120	48.1	1.98		47.0	3.54	0.162	47.1	3.59	0.156	46.9	2.61	0.068
140	47.1	2.05		48.6	3.60	0.147	48.6	3.57	0.188	47.2	2.53	0.082
156.6	48.1	2.11		48.2	3.61		49.7	3.58		48.6	2.46	
平均		1.99	0.106		3.73	0.197		3.49	0.202		2.72	0.140

観測月日	(5) 1936.Ⅶ (干) 1 st 10 ^h 42 ^m ~12 ^h 06 ^m			(6) (満) 1 st 17 ^h 17 ^m ~19 ^h 02 ^m			(7) (満) 2 nd 19 ^h 42 ^m ~20 ^h 54 ^m			(8) (満) 3 rd 9 ^h 17 ^m ~11 ^h 10 ^m		
	深サ	温 度	湧出量	$\gamma \frac{\partial T}{\partial r}$	温 度	湧出量	$\gamma \frac{\partial T}{\partial r}$	温 度	湧出量	$\gamma \frac{\partial T}{\partial r}$	温 度	湧出量
m	°C	L/M		°C	L/M		°C	L/M		°C	L/M	
0	37.5	3.01		37.2	3.75		38.2	4.59		38.7	4.50	
20	39.8	2.93	0.186	41.5	3.79	0.181	40.5	4.57	0.322	40.5	4.48	0.281
40	40.9	2.90	0.172	39.8	3.75	0.170	42.0	4.59	0.290	42.0	4.39	0.278
60	43.0	2.86	0.189	44.0	3.91	0.374	44.0	4.68	0.357	44.0	4.39	0.282
80	44.6	2.75	0.154	45.0	4.00	0.162	46.2	4.50	0.102	45.4	4.37	0.208
100	46.0	2.74	0.121	46.1	4.02	0.151	45.2	4.64	0.068	46.5	4.24	0.142
120	47.0	2.71	0.061	47.1	4.18	0.108	47.0	4.69	0.190	47.2	4.18	0.108
140	47.1	2.54	0.063	47.4	4.29	0.017	47.3	4.72	0.105	48.0	4.09	0.100
156.6	48.3	2.49		47.4	4.34		48.3	4.74		48.3	4.09	
平均		2.77	0.135		4.01	0.166		4.64	0.205		4.80	0.200

別府温泉二三の湧出口導管中に於ける泉温分布と途中冷却率

観測 月日	(9)			(10) 1936.Ⅷ (満)			(11)			(12)		
	3rd 14h 07m~15h 24m			4th 9h 24m~10h 37m			4th 14h 49m~16h 00m			5th 9h 38m~11h 01m		
深サ	温 度	湧出量	$\gamma \frac{\partial T}{\partial r}$	温 度	湧出量	$\gamma \frac{\partial T}{\partial r}$	温 度	湧出量	$\gamma \frac{\partial T}{\partial r}$	温 度	湧出量	$\gamma \frac{\partial T}{\partial r}$
m	°C	L/M		°C	L/M		°C	L/M		°C	L/M	
0	38.0	2.58		39.0	4.74		37.0	2.68		39.5	5.15	
20	39.1	2.50	0.111	41.0	4.86	0.285	39.0	2.65	0.157	41.0	5.15	0.247
40	40.5	2.45	0.167	42.2	4.84	0.269	40.5	2.61	0.309	42.2	5.08	0.301
60	42.5	2.54	0.186	44.0	4.84	0.340	43.0	2.57	0.099	44.2	5.00	0.373
80	44.5	2.54	0.159	46.0	4.81	0.281	44.5	2.57	0.149	46.2	5.03	0.223
100	45.8	2.50	0.102	46.5	4.74	0.123	46.0	2.59	0.115	46.6	5.06	0.093
120	46.8	2.50	0.082	47.0	4.67	0.104	47.0	2.61	0.077	47.2	4.93	0.092
140	47.5	2.47	0.080	47.8	4.62	0.132	47.5	2.61	0.074	47.6	4.85	0.118
156.6	48.4	2.41		48.4	4.62		48.5	2.63		48.4	4.80	
平均		2.61	0.127		4.75	0.212		2.61	0.140		5.01	0.207

観測 月日	(13)			(14)			平均
	5th 14h 43m~16h 01m			6th 10h 08m~11h 30m			
深サ	温 度	湧出量	$\gamma \frac{\partial T}{\partial r}$	温 度	湧出量	$\gamma \frac{\partial T}{\partial r}$	$\gamma \frac{\partial T}{\partial r}$
m	°C	L/M		°C	L/M		
0	37.5	2.31		39.1	5.22		
20	39.5	2.81	0.187	41.1	5.26	0.291	0.220
40	41.0	2.82	0.177	42.0	5.26	0.291	0.230
60	43.0	2.81	0.194	44.1	5.17	0.384	0.261
80	44.7	2.65	0.149	46.0	5.15	0.227	0.177
100	46.0	2.57	0.107	46.6	5.00	0.131	0.118
120	47.0	2.65	0.068	47.2	5.00	0.127	0.100
140	47.4	2.65	0.075	47.9	4.74	0.136	0.094
156.6	48.4	2.61		48.6	4.62		
平均		2.71	0.137		5.05	0.227	0.171

第二表 湧出導管中の泉温

温泉 No. 422 1936.Ⅷ.18th		温泉 No. 423 1936.Ⅷ.18th		温泉 No. 434/4 1936.Ⅷ.18th	
深サ	泉温	深サ	泉温	深サ	泉温
m	°C	m	°C	m	°C
0	59.6	0	62.0	0	52.0
70	61.6	79	66.1	90	62.0

第三表 湧出導管中の泉温
と湧出量

第2例 温泉 No. 220

観測 月日	(1) 1936.Ⅷ (満)		
	8th 11h 02m~12h 55m		
深サ	温 度	湧出量	$\gamma \frac{\partial T}{\partial r}$
m	°C	L/M	
0	65.0	24.13	
10	63.7	23.70	0.871
20	64.0	23.70	0.188
30	64.2	23.58	
40	64.5	23.17	0.186
50	64.7	23.09	
60	65.0	22.73	0.271
70	65.0	22.29	
80	65.1	22.14	0.088
90	65.1	22.03	
100	65.1	21.68	0.324
112	65.5	21.54	
平均		22.82	0.322

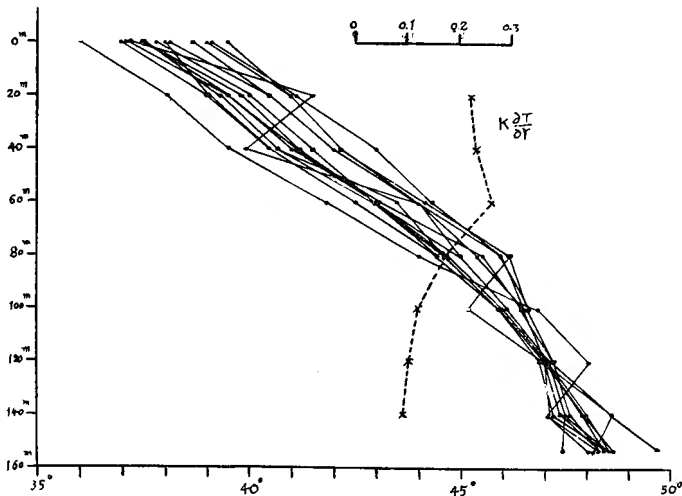
別府温泉二三の湧出口導管中に於ける泉温分布と途中冷却率

観測 月日	(2) (干)			(3) (満)			(4) (干)			(5) (干)						
	8 th 16 ^h 53 ^m ~18 ^h 24 ^m	9 th 11 ^h 54 ^m ~13 ^h 21 ^m	9 th 18 ^h 16 ^m ~19 ^h 18 ^m	10 th 19 ^h 28 ^m ~20 ^h 24 ^m	温度	湧出量	$\gamma \frac{\partial T}{\partial r}$	温度	湧出量	$\gamma \frac{\partial T}{\partial r}$	温度	湧出量	$\gamma \frac{\partial T}{\partial r}$	温度	湧出量	$\gamma \frac{\partial T}{\partial r}$
0	62.5	17.76		63.8	22.78		63.3	18.14		62.8	19.48					
10	63.5	17.61	1.117	64.4	22.78	0.904	64.2	18.02	1.009	63.4	19.43	0.925				
20	64.0	17.10	0.844	64.8	22.40	0.355	64.7	18.02	0.214	63.8	18.98	0.231				
40	64.5	17.16	0.354	65.2	21.78	0.252	64.9	17.85	0.139	63.9	19.62	0.153				
60	64.5	16.13	0.209	65.2	20.80	0	65.1	17.68	0.141	64.2	18.98	0.304				
80	65.0	16.13	0.127	65.2	20.90	0	65.2	17.75	0	64.8	18.67	0.297				
100	65.0	15.77	0.367	65.3	20.15	0.082	65.2	16.88	0.126	64.9	18.34	0.133				
112	65.5	15.89		65.3	20.15		65.3	17.68		65.1	18.02					
平均		16.69	0.421		21.47	0.266		17.75	0.272		18.95	0.341				

観測 月日	(6) (満)			(7) (干)			(8) (干)			(9) (満)			平均			
	11 th 13 ^h 54 ^m ~11 ^h 56 ^m	11 th 19 ^h 52 ^m ~21 ^h 37 ^m	12 th 9 ^h 43 ^m ~10 ^h 53 ^m	12 th 16 ^h 24 ^m ~17 ^h 49 ^m	温度	湧出量	$\gamma \frac{\partial T}{\partial r}$	温度	湧出量	$\gamma \frac{\partial T}{\partial r}$	温度	湧出量		$\gamma \frac{\partial T}{\partial r}$	温度	湧出量
0	62.9	21.13		62.9	20.36		62.3	16.13		62.9	22.14					
10	62.8	21.00	0.839	63.8	20.36	0.812	63.2	16.08	1.216	63.6	22.29	1.060	0.972			
20	64.0	20.30	0.333	63.9	19.68	0.153	63.8	15.57	0.250	64.1	22.29	0.267	0.260			
40	64.5	20.90	0.332	64.3	19.39	0.380	64.4	15.50	0.307	64.3	22.40	0.355	0.273			
60	64.9	20.68	0.243	64.9	18.26	0.223	64.7	15.22	0.121	64.9	22.14	0.440	0.217			
80	65.1	20.61	0.044	64.9	18.74	0	64.3	14.72	0.178	65.2	21.78	0.173	0.110			
100	65.2	20.27	0.147	64.9	18.34	0.536	65.2	14.69	0.214	65.3	21.33	0	0.205			
112	65.4	20.15		65.3	18.43		65.3	14.97		65.3	21.44					
平均		20.71	0.314		19.23	0.252		15.36	0.332		21.98	0.333	0.340			

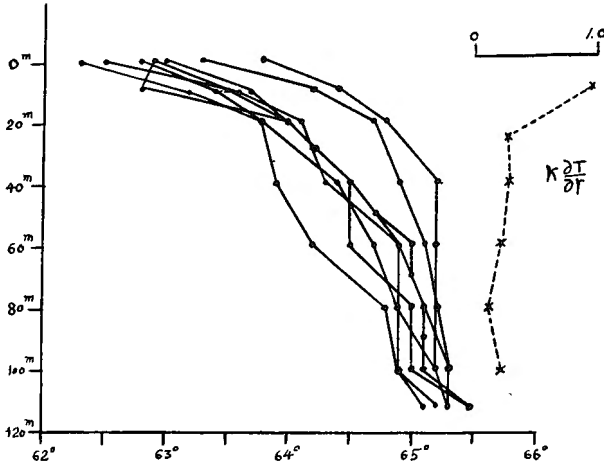
第 1 圖 湧出口導管中の泉温分布其ノ一

NO.434-1 鶴水園



別府温泉二三の湧出口導管中に於ける泉温分布と途中冷却率

第 I 圖 其ノ二
No.220 和田産別荘



を圖示した。第一圖を見れば明かに湧出口導管中の泉温は深さの増すにつれて上昇するのが知られ管中にて冷却されてゐることは明かである。又湧出量の大小に應じて上端泉温は上下し、同時に深きに進むにつれて次第にその差が小となり、泉底では潮の満干による湧出量の増減に拘らず略ほ同

じ温度を示すことは最も注意すべき事實である。但し底温は完全に同一温度ではなく、又途中の泉温もそのまゝ上端温度の大小を保たずに幾分温度線が互に入り亂れては居るが、ある程度の測定誤差を考へれば、深部に進むに従ひある一定温度に集中して行くものと考えられる。之に依つて、潮汐に伴ふ温度の變化は湧出量の大小による冷却の差によるもので、而も其の冷却は主として泉管内のみで行はれることが分る。

元來、地層中に垂直な高温圓導管のある場合の温度 T に對しては

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \dots\dots\dots (1)$$

が成立する。但上式は圓導座標の熱傳導を示すもので、可なり事情を簡單にして考へても今の場合には境界條件が複雑で目的に副ふ様な完全解は得難い。

そこで茲には大體の冷却程度を知る爲に管壁の温度勾配と熱傳導率の積 $\kappa \frac{\partial T}{\partial r}$ を上端から下端までの平均値をとることゝする。今、上に管壁と漠然と言つたけれども、内壁と外壁と、又竹製と鐵製との導管で大いに意味が異り $\kappa \frac{\partial T}{\partial r}$ の値にも大きい差がある筈であるが實際に求めた値からいふと大差ない。尙細かくいふならば外壁ならば土壤岩石となり内壁ならば竹、鐵何れにしろ少し経てば沈澱物で蓋はれてしまふのである。

そこで導管下端の温度を T_0 、上端のそれを T_1 、湧出量を q 、導管の長さを l 、その口徑

を $2r$ とすれば上より

$$q(T_b - T_u) = 2\pi r l \kappa \frac{\partial T}{\partial r} \dots\dots\dots(2)$$

この式は導管の各部分 Δl の両端温度 T'_b, T'_u としても成立しなければならぬ。即ち

$$q(T'_b - T'_u) = 2\pi r \Delta l \kappa \frac{\partial T}{\partial r} \dots\dots\dots(3)$$

(3) 式によつて $\kappa \frac{\partial T}{\partial r}$ の各層の値を計算し第 1 第 3 表に併記して置いた。その各層の平均値に就ては第一圖に示してあるが、夫れによると、鶴水園のものは 60m~80m を界として上下の値が異り、和田彦別荘のものは 20m あたりから上が大きい値を持つてゐる。即これら以深は附近の地層が比較的高温で以浅は比較的低温であるのであらう。上層に比較的低温の地下水の存在を示すものか、又は地質の異常であるかも知れぬ。

こゝに得た $\kappa \frac{\partial T}{\partial r}$ の平均値は先きの潮汐影響の研究⁽³⁾に於て求めた値と同程度である。その節には T_b の観測がないから之を不変として(2)式を變形したる

$$-\Delta T_u = -\Delta \frac{1}{q} \times 2\pi r l \kappa \frac{\partial T}{\partial r} \dots\dots\dots(4)$$

より求めたものである。(4)によつて今回の観測値より求めた $\kappa \frac{\partial T}{\partial r}$ を第四表に於て示

第四表 式(4)より求めたる $\kappa \frac{\partial T}{\partial r}$

No. 434'1			No. 220		
組合セ		$\kappa \frac{\partial T}{\partial r}$	組合セ		$\kappa \frac{\partial T}{\partial r}$
1	2	0.040	1	2	0.239
3	4	0.036	3	4	0.317
5	6	0.024	5	6	0.236
7	8	0.423	7	8	0.328
9	10	0.031	平均		0.250
11	12	0.075			
13	14	0.052			
平均		0.098			

す。この値は第 1, 2 表の何れよりも小さく出てる。これは(2)に於て T_b が一定でないこと即ち導管以前よりの冷却もあらうし、管中のみにても厳密に言へば(1)の解より求めなければならぬ事によるが、更に前論文に述べた如き⁽³⁾泉温と湧出量との同時観測對應の相違による誤差も入つてくるのであらう。

兎も角上述の如く、潮汐に伴ふ湧出量と泉温との變化を観測することにより泉管下端の温度推定がある程度まで可能なることを示すと言つてよい。

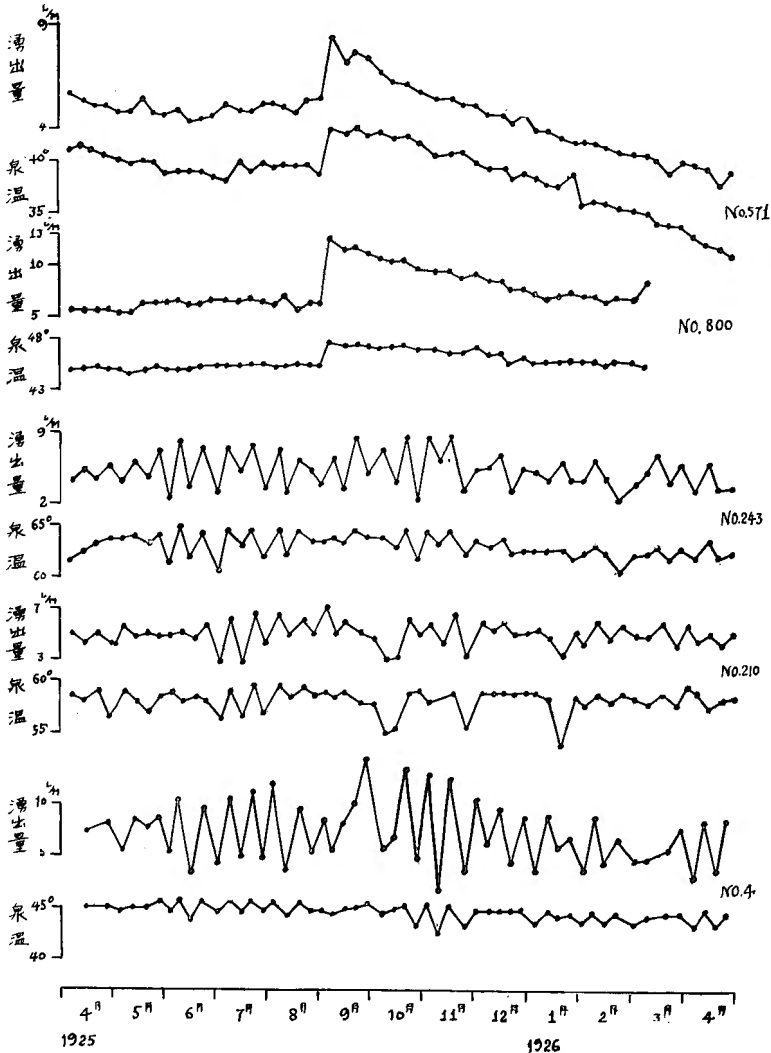
2. 週観測より求むる泉管途中の冷却率 $\kappa \frac{\partial T}{\partial r}$

(3) 別府温泉と潮汐; 本誌第2巻第1號1頁。

別府温泉二三の湧出口導管中に於ける泉温分布と途中冷却率

週一回観測の湧出量變動が潮汐の影響を示すものである事は別論文に明かにしたところ⁽⁴⁾である。従つて又週観測の泉温に及ぼす潮汐の影響も上述の事より認められる筈である。事實第2圖に例示するが如く、湧出量と泉温との變化の並行性は明かである。従つてこの記録により、 $\frac{\partial T}{\partial r}$ を算出する事が出来る。但し使用の寒暖計は $\frac{1}{2}^{\circ}$ 目盛にして精密度が湧

第2圖 湧出量と泉温週観測圖



出量測定に及ばない爲か、並行性が明に示されないところもあり、潮汐の影響の小さいと

(4) 瀬野, 「別府温泉の感潮度分布」本誌本號 24 頁。

別府温泉二三の湧出口導管中に於ける泉温分布と途中冷却率

ころは特に然りである。依て資料欄連載中の「泉温及湧出量連続観測表」中二者の並行せるところのみを上述の理由に基づくものとして、多数湧出口の $\kappa \frac{\partial T}{\partial r}$ を求め第五表を得た。多くのものは上の二湧出口のものと略々同一の程度の値を得た。

第五表 週観測泉温変化より算出した多数湧出口の $\kappa \frac{\partial T}{\partial r}$ 表

湧出口 番 號	$\kappa \frac{\partial T}{\partial r}$	湧出口 番 號	$\kappa \frac{\partial T}{\partial r}$	湧出口 番 號	$\kappa \frac{\partial T}{\partial r}$	湧出口 番 號	$\kappa \frac{\partial T}{\partial r}$	湧出口 番 號	$\kappa \frac{\partial T}{\partial r}$
(1925) 4	0.181	145	0.284	388	1.105	564	2.988	854	0.368
(1934) 4	0.294	158	0.512	409	0.552	571	0.313	868	0.198
10	0.294	173	0.295	423	0.276	575	1.590	901	0.559
17	0.307	194	0.829	429	0.729	634	6.431	903	0.374
31	0.151	210	0.342	480	0.208	652	0.274	992	0.430
39	0.346	212	0.168	450'1	2.471	666	0.503	996	0.155
46	0.481	233	0.168	451'1	1.201	671	1.855	1047	0.360
55	0.573	243	0.216	451'3	0.744	675	1.149	1048	0.222
62	0.808	258	0.152	472	0.728	685	0.392	1153	0.390
69	0.335	279	0.915	511	0.243	692	1.426	1183	0.239
81	0.309	291	0.788	526	0.508	713	0.243	1254'1	0.345
92	0.586	309	0.195	534	1.420	771	2.060	1260	0.267
100	0.290	343	0.320	539	0.140	781	0.174		
108	0.102	351	3.462	557	1.069	800	0.725		
110	0.308	370	0.960	561	0.915	838	0.838		

潮汐の影響の小さいところは降雨の影響が大きい。⁽⁵⁾之に伴つて泉温も並行して變化する(第2圖参照)。これも同上の原因によるものとして $\kappa \frac{\partial T}{\partial r}$ を求めた(但しこの場合長期に渉る期間の温度差を基にすると、温泉の氣温による影響が混入する虞れがあるから避けなければならぬ⁽⁶⁾)。かくて求めた $\kappa \frac{\partial T}{\partial r}$ は程度は略々同じであるが常に大きい値が得られた。これは前者の場合には(2)に於ての分布が週期的であるのに反し、後者の場合は然らず地層中の一方的變化によつたり、降雨による地下状態例へば κ の異常變化に基づくのであらう。(第五表参照)

かくて別府市街全域に涉つて $\kappa \frac{\partial T}{\partial r}$ の分布も得られるのであるが、その分布状態は特に言ふべきこともないやうである。

尙筆者は依頼を受け大分縣直入郡都野村七里田温泉に於て調査したところ第六表の如

(5) 本誌次號「別府温泉の湧出量に及ぼす降雨影響分布」参照。

(6) 同 「別府温泉の涵養源としての雨量」参照。

別府温泉二三の湧出口導管中に於ける泉温分布と途中冷却率

き結果となつた。即ち新湯に於ける場合は泉温の降下状況は殆んど一様で地下5~10mの

第六表 大分縣直人郡都野村七里田温泉(昭和十一年十月十日)

1. 新 湯

深度 32 m 口径2寸 パイプなし
湧出量 = 1.37 L/分

2. 下 湯

深度 37.5 m 口径2寸 パイプなし
湧出量 = 183.6 L/分

深さ	泉 温	$\times \frac{\partial T}{\partial r}$
0	34.0	0.145
5	35.0	0.218
10	36.5	0.145
15	37.5	0.160
20	38.6	0.145
25	39.6	0.145
30	40.6	0.145
32	41.0	0.145
	平均	0.158

深さ	泉 温
0	40.0
5	40.1
10	40.0
15	40.0
20	40.0
25	40.1
30	40.1
35	40.0
37.5	40.0

間にて稍々冷却の大なるを見る。この値を別府温泉に比較して $\left| \times \frac{\partial T}{\partial r} \right|$ は同一程度であるといふ面白き結果となつた。下湯に於ては湧出口上端まで泉温が全く冷却されてゐないといつてよい。之は湧出量甚大による結果であつて例へば $\times \frac{\partial T}{\partial r}$ が新湯と同値と見ても全過程に於て冷却度は $0.06C$ であつて観測程度を越えてゐるのである。尙いづれも導管を使用してゐないのは岩盤の多き結果で、従つて上の $\times \frac{\partial T}{\partial r}$ も岩石の水を含みたる場合の値と見てよい。

終りに、絶えず懇切なる指導を賜つた恩師野満博士に深謝の意を表するものである。